

# **Modellierung von Baugrund-Tragwerk-Systemen für die parallele numerische Simulation unter Berücksichtigung dynamischer Aspekte**

Lutz Lämmer

PROSTEP AG

30625 Hannover, Germany

E-Mail: laemmer@prostep.de

Jochen Ruben

Technische Universität Darmstadt

Institut für Numerische Methoden in Informatik im Bauwesen

Petersenstraße 13, 64287 Darmstadt, Germany

E-Mail: Sekretariat@iib.tu-darmstadt.de

## **Kurzfassung**

*Bei der Gründung von schweren Bauwerken (z.B. Hochhäusern auf Gründungsplatten und -pfählen) wird der Lastabtrag in den Baugrund durch eine starke Interaktion zwischen Bauwerk und Baugrund bestimmt. Der Baugrund kann phänomenologisch als Mehrphasenkontinuum beschrieben werden, bei dem die Phasen Feststoff, Flüssigkeit und Gas in mechanische Wechselwirkung treten. Die Wechselwirkung zwischen der Deformation des Feststoffes und der Strömung des Porenwassers spielt unter der Lasteinwirkung des Bauwerks und unter dynamischer Erregung eine zentrale Rolle. Bei komplexen Gründungsverhältnissen können die Deformations- und Spannungszustände realitätsnah nur durch dreidimensionale Modelle erfasst werden. Je nach Baufortschritt stellen sich die Probleme dabei unterschiedlich dar.*

*Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der für die mit der Simulation mit der Methode der finiten Elemente notwendigen Modellierung und der rechnergestützten Netzgenerierung für die Baugrund-Tragwerk-Strukturen.*

*Bei komplexen dreidimensionalen Gründungskonstruktionen ist eine solche rechnergestützte Diskretisierung mit finiten Elementen zweckmäßig, die das geotechnische System und dessen Randbedingungen und Lasten umfassend beschreiben und verwalten kann. Dafür werden geeignete Software-Werkzeuge vorgestellt, mit denen sich dreidimensionale, zeitabhängige Systeme modellieren und diskretisieren lassen. Die Kontaktproblematik zwischen Baugrund und Tragwerk und die Besonderheiten des Mehrphasenkontinuums stellen besondere Ansprüche an die Diskretisierung. Zudem werden Methoden vorgestellt, die das akkumulierte Gründungsmodell, das sich über den Bauablauf ergibt, verwalten und die verschiedenen Bauzustände in einem dynamischen Modell bereitstellen.*

# 1 Einleitung

Die Methode der finiten Elemente ist für die Simulation von Baugrund-Tragwerk-Strukturen sehr gut geeignet. Mit ihr können das komplexe Materialverhalten im Zusammenhang mit zeitabhängigen Setzungsvorgängen simuliert werden. Unter Verwendung der „Theorie der porösen Medien“ kann das Verhalten des Bodenkontinuums modelliert werden. Durch die Anwendung des „Konzepts der Volumenanteile“ wird die Interaktion der drei Phasen Feststoff, Fluid und Gas beschrieben [Ter2001].

Die numerische Simulation des zeitabhängigen Verhaltens dreidimensionaler Baugrund-Tragwerk-Systeme ist wegen ihrer Komplexität, der Größe praxisrelevanter Problemstellungen und der nötigen Netzdichte auf Einzelplatzrechnern nur mit sehr großem Zeitaufwand durchführbar. Erst durch die Nutzung verteilter Rechner-Ressourcen oder von Parallelrechnern wird die numerische Simulation größerer Systeme mit der erforderlichen Genauigkeit in vertretbarem Zeitaufwand möglich.

Eine manuelle Diskretisierung der Baugrund-Tragwerk-Strukturen ist unter Berücksichtigung von zugehörigen Lasten und Randbedingungen aufgrund der Komplexität kaum durchführbar. Daher ist es notwendig, Software-Werkzeuge zur Verfügung zu stellen, die eine dreidimensionale und zeitabhängige Modellierung sowie eine rechnergestützte Diskretisierung ermöglichen. Besondere Vorteile ergeben sich durch eine Partitionierung der Systeme schon vor der Netzgenerierung selbst.

## 2 Netzgenerierung

Die automatische Netzgenerierung für die Methode der finiten Elemente ist ein unverzichtbarer Bestandteil eines effizienten Simulationssystems. Die Generierung einer dreidimensionalen Diskretisierung wird hier für das konkrete Anwendungsfeld der Simulation der Baugrund-Tragwerk-Interaktion vorgestellt. Dabei umfasst die Netzgenerierung die folgenden vier Teilschritte, die iterativ durchlaufen werden müssen [Wea1996]:

1. Die Modellbeschreibung besteht aus der mathematischen Beschreibung der Systemgeometrie und der mechanischen Systemeigenschaften die vorzugsweise mit Hilfe eines CAD-Systems für die Geotechnik durchgeführt wird [Lae1997, Bur2001]. Dabei ist auf die konsistente Wiedergabe des Systems als Datenbasis für die Diskretisierung zu achten.
2. Die Parameterspezifikation ist die interaktive Definition von zusätzlichen Kontrollparametern für die Netzgenerierung, wie z.B. die Angabe lokaler und globaler Netzdichten und die Zerlegung des Problems in Teilgebiete.
3. Die Netzgenerierung beinhaltet das automatische Erzeugen von Netzknoten im Raum und ihres topologischen Zusammenhangs zur Bildung von finiten Elementen unterschiedlicher Form. Dieser Schritt ist rechenaufwändig und erfordert die Überprüfung der Konsistenz der Eingaben und des Ergebnisnetzes.
4. Die Evaluierung ist die interaktive Kontrolle der Vernetzung auf Erfüllung der Anforderungen an die geplante Berechnung. Unter Umständen ist die Geometriebeschreibung oder die Spezifikation des Systems zu variieren und der Bearbeitungszyklus zu wiederholen.

### **3 Diskretisierung von Baugrund-Tragwerk-Systemen**

Für die Anwendung der Methode der finiten Elemente auf dreidimensionale Probleme werden in der Praxis aufgrund der besseren Konvergenzeigenschaften Hexaederelemente bevorzugt. Zudem bietet sich diese Diskretisierung von Baugrund-Tragwerk-Systemen mit meist orthogonalen Strukturen der Modelle an.

Auf der Basis eines digitalen Geländemodells, in das die Gründungskonstruktion mit der Hilfe von CAD-Funktionalität eingeplant werden kann, wird eine geeignete Oberflächenvernetzung mit Dreieckselementen konstruiert. Zur grafischen Repräsentation der dreidimensionalen Geometrie werden diese Dreiecknetze in die Tiefe extrudiert.

In der Praxis sind die Erzeugung einer für die Netzgenerierung geeigneten Geometrie, die applikationsgerechte Spezifikation der Steuerungsparameter eines Netzgenerators und die gründliche Evaluierung des generierten Netzes sehr arbeitsintensive Aufgaben. Neben der Netzgenerierung für das dreidimensionale Baugrund-Tragwerk-System wurde die korrekte Zuordnung von Systemeigenschaften, Randbedingungen und Belastungen für ein diskretisiertes System unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen, die aus der Geotechnik resultieren, umgesetzt.

#### **3.1 Dynamisches Baugrund-Tragwerk-Modell**

Die im Geotechnischen Informationssystem (GTIS) [Sch1998, Dia1997] implementierten Teilmodelle des Bodenmodells und des Konstruktionsmodells wurden durch das Überlagern einzelner Objektinformationen um ein Bauablaufmodell ergänzt. Damit werden die geotechnischen Objekte mit einem dynamischen Prozessmodell kombiniert, woraus sich ein dynamisches Modell im Sinne des Bauablaufs ergibt. Die Zustände müssen sich dabei auf das gesamte Modell bzw. auf Objektgruppen und nicht nur auf einzelne Objekte beziehen.

Die verschiedenen Bauzustände müssen sich allerdings auch in unterschiedlichen Diskretisierungen des Baugrund-Tragwerk-Modells widerspiegeln, da die Simulation eines bestimmten Bauzustandes nur mit den Zustandsgrößen der Berechnung des vorangegangenen Bauzustandes sinnvoll ist. Um das zu gewährleisten, wurde eine automatische Übernahme der Zustandsgrößen für die Diskretisierung des nächsten Bauzustandes durch die Verwaltung der Modelle in einer objektorientierten Datenbank realisiert. Dafür wurde eine Schnittstelle entsprechend der STEP-Norm [Rub2002] erarbeitet und umgesetzt. In der Datenbank werden die digitalen Baugrund-Tragwerk-Modelle inklusive der Lasten, Rand- und Übergangsbedingungen und Zustandsgrößen unter Berücksichtigung der Mehr-Phasen-Theorie, der Kontaktproblematik und der Abfolge der Bauzustände abgelegt. Damit wird eine durchgängige und vollständige Simulation der Modelle über den Baufortschritt ermöglicht.

#### **3.2 Projektions-Modell**

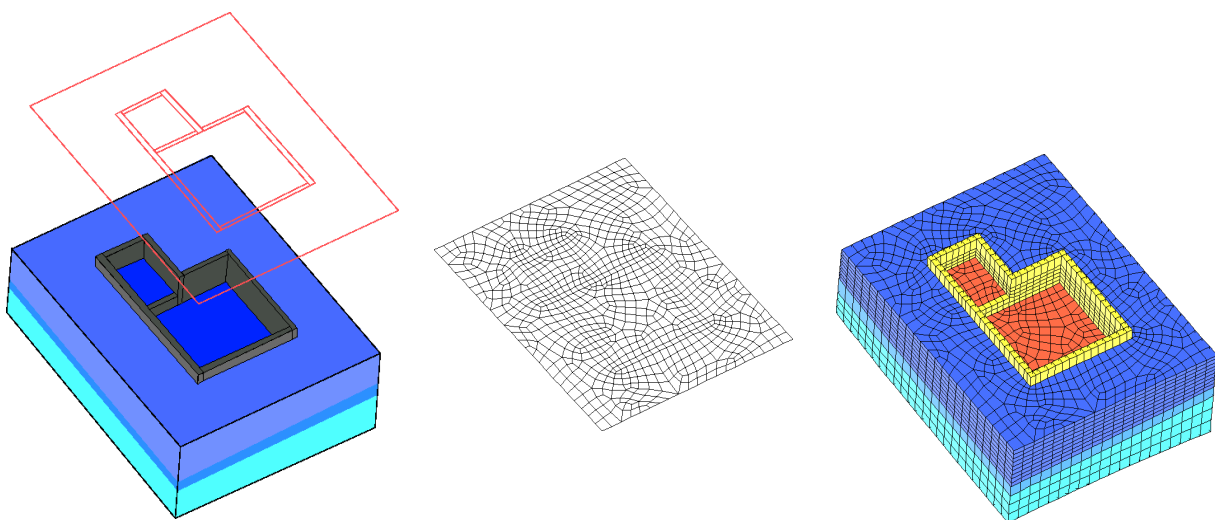
Die Diskretisierung der dreidimensionalen Baugrundmodelle lässt sich mit verschiedenen Techniken durchführen. Die Netze lassen sich in drei Arten klassifizieren:

- strukturierte Netze mit einer konstanten Anzahl von angrenzenden Elementen im Knoten,
- unstrukturierte Netze mit unterschiedlicher Anzahl angrenzender Elemente im Knoten und
- hybride Netze als Kombination dieser beiden Arten (siehe [Bur2001]).

Zur Abbildung der komplexen Geometrien von Baugrund-Tragwerksystemen in Finite-Element-Netzen eignen sich jedoch nur unstrukturierte Netze, da im Vergleich zu strukturierten Netzen eine deutlich höhere Flexibilität der Generierungsalgorithmen für die zu vernetzenden Geometrie erforderlich ist. Hier lassen sich lokale Verfeinerungen in den Netzen einfacher und mit wesentlich geringeren Elementanzahlen realisieren.

Die direkte dreidimensionale Diskretisierung mit Tetraeder-Elementen lässt sich mit Hilfe der Delaunay-Triangulierung durchführen. Für die Anwendung der Methode der finiten Elemente auf dreidimensionale Probleme werden jedoch aufgrund der besseren Konvergenzeigenschaften i.a. Hexaederelemente bevorzugt. Zudem bietet sich diese Diskretisierung von Baugrund-Tragwerk-Systemen mit meist orthogonalen Strukturen der Modelle an. Daher wurde die Projektionstechnik, die zur Erzeugung von Prisma-Netzen verwendet wird und auf einer 2½-dimensionalen Darstellung der Geometrie basiert, modifiziert und erweitert, um die Baugrundmodelle mit Hexaeder-Elementen zu diskretisieren. Die modifizierte Projektionstechnik zur Diskretisierung von Baugrund-Tragwerk-Modellen besteht aus den folgenden Schritten und ist in Abbildung 1 illustriert:

1. Projektion: Die geometrischen Informationen der Topologie des Baugrund-Modells und der geotechnischen Konstruktionselemente werden auf eine horizontale Ebene projiziert, wobei schon hier durch die Vorgabe von Dichtefunktionen die Qualität der Diskretisierung in lokalen Bereichen verbessert werden kann
2. 2D-Netz: Das projizierte Modell, bestehend aus Linien, Polygonzügen und Punkten, wird mit Hilfe der Delaunay-Triangulierung vernetzt und das entstandene Dreiecksnetz wird durch die Anwendung verschiedener Qualitätskriterien geglättet und anschließend in ein Vierecknetz überführt.
3. Extrusion: Die Viereckelemente werden in die Tiefe extrudiert. Dabei entstehen Hexaederelemente, wobei zunächst die Anzahl der Elementschichten aufgrund von Tiefeninformationen der Bodenschichten und der geotechnischen Konstruktionselemente zu ermitteln ist.



**Abbildung 1: Projektionstechnik zur Diskretisierung von Baugrund-Tragwerk-Modellen**

### 3.3 Netzverfeinerung

Zur Unterstützung adaptiver Methoden können diese Hexaederelemente durch eine nachträgliche Anwendung der Dreierverfeinerung für dreidimensionale Netze verfeinert werden, um die Konvergenzgeschwindigkeit der numerischen Simulation zu steigern. Dieses Vorgehen ist insbesondere in Bereichen von Pfahlgründungen sinnvoll (Abbildung 2), da in diesen Gebieten durch den konzentrierten Lastabtrag große Residuen zu erwarten sind. Die Kontaktproblematik wurde durch die Generierung von „Kontaktflächen“ erfasst [Bur2000], die den Baugrund und den Pfahl entkoppeln und mit denen über Kontaktbedingungen die Mantelreibung des Pfahls in der Simulation berücksichtigt werden kann.

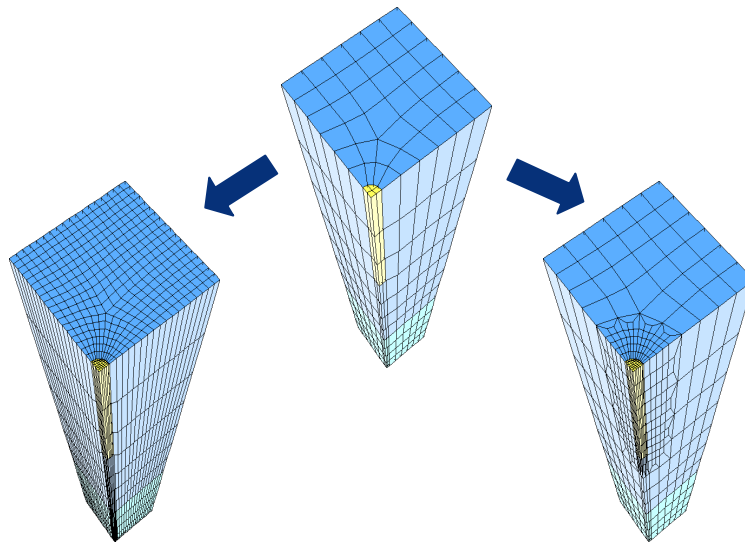


Abbildung 2: Lokale Dreierverfeinerung im Bereich einer Pfahlgründung

## 4 Parallele Diskretisierung

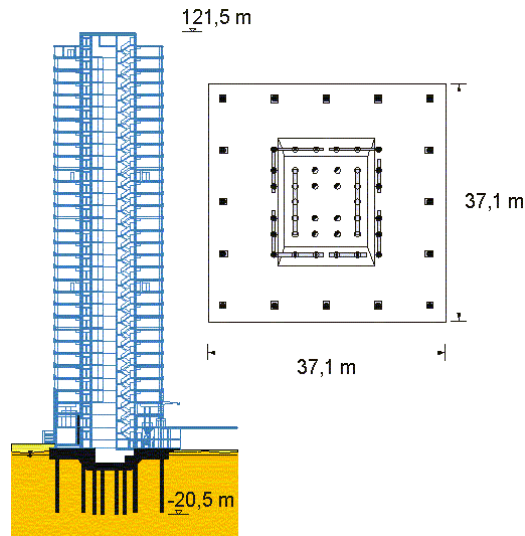
Eine erhebliche Beschleunigung der Berechnung ist durch die Parallelisierung möglich. Voraussetzung für die Anwendung auf vernetzten Arbeitsplatzrechnern ist eine statische oder dynamische Gebietszerlegung und die Zuordnung der einzelnen finiten Elemente zu Teilgebieten [Lae1997].

Zur Beschleunigung der Netzgenerierung wurde eine Methodik entwickelt, implementiert und umgesetzt, bei der das Gebiet vor der eigentlichen Diskretisierung mit Hilfe der Schwerachsenmethode [Bur2000] partitioniert wird. Erst in einem zweiten Schritt werden dann die so entstandenen Teilgebiete auf den einzelnen Prozessoren unter Berücksichtigung der mechanischen Koppelbedingungen der Teilnetze vernetzt. Dieses Vorgehen ermöglicht eine parallele Diskretisierung mit sehr hoher Effizienz.

## 5 Anwendungsbeispiel

Ein geeignetes Demonstrationsbeispiel für komplexe Baugrund-Tragwerk-Strukturen ist die Gründung des Hochhauses Treptower in Berlin. Das Gebäude ist mit 31 Obergeschossen

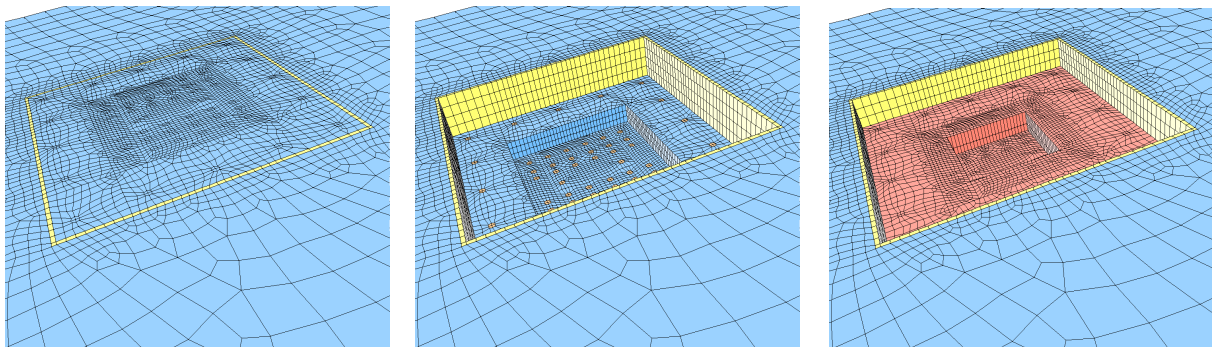
121,5 m hoch und wurde auf einer Kombinierten-Pfahl-Platten-Gründung [Kat1993] mit einer 37,1m x 37,1 m großen Grundplatte und insgesamt 54 mantelverpressten Bohrpfählen mit einer Länge von bis zu 16 m gegründet. Abbildung 3 zeigt einen Schnitt und einen Grundriss des Gebäudes bzw. der Gründung [Reu2000].



**Abbildung 3: Treptower: Schnitt und Grundriss**

## 5.1 Diskretisierung von Bauzuständen

Abbildung 4 zeigt drei verschiedene Bauzustände der Gründung des Treptowers. Der erste Bauzustand nach Einbringen der Spundwände. Schon hier sind jedoch die Geometrien der später einzubringenden geotechnischen Konstruktionselemente in der Diskretisierung zu erkennen. Der nächste Bauzustand zeigt die Baugrube nach dem Aushub auf die endgültige Baugrubentiefe und dem Einbringen der mantelverpressten Bohrpfähle. Im letzten Bild ist das Finite-Element-Netz der fertig gestellten Gründung nach dem Einbringen der Fundamentplatten zu sehen.

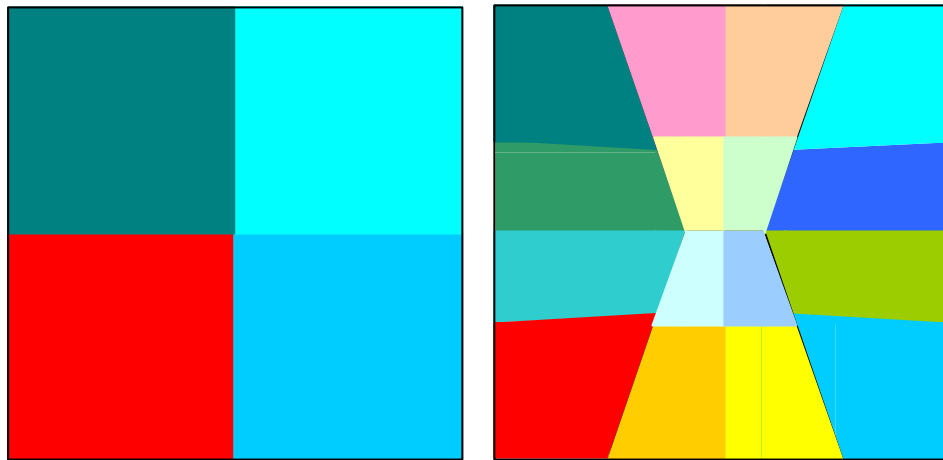


**Abbildung 4: Diskretisierung verschiedener Bauzustände der Treptower-Gründung**

## 5.2 Effektivität der Parallelisierung

Die Effektivität der Parallelisierung kann durch den charakteristischen Aufwand Diskretisierung des Systems bestimmt werden. Zusätzlich ist der in der parallelen Verarbeitung begründete Aufwand einzubeziehen [Lae1997]. Ein besonders anschaulicher Leistungsindikator für

parallele Verarbeitungsmethoden ist die Effizienz. Sie gibt an, zu welchem Grad das Leistungspotential der parallel geschalteten Prozessoren tatsächlich ausgenutzt wird.

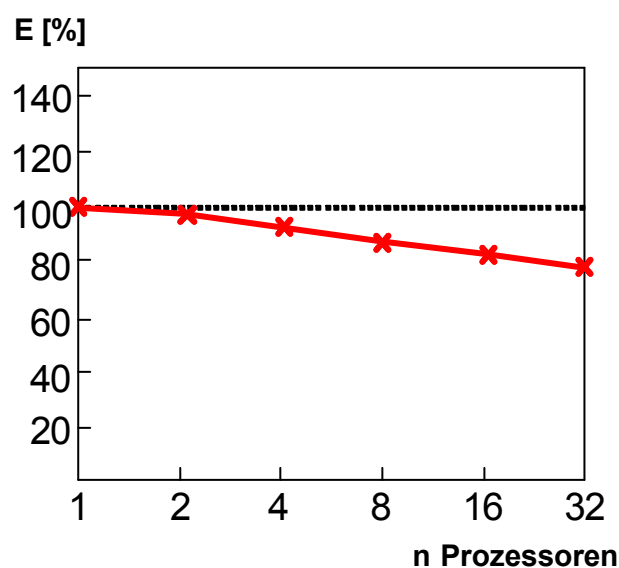


**Abbildung 5: Partitionierung des Projektionsmodells vier und 16 Prozessoren**

Die Partitionierung der projizierten Baugrund-Tragwerk-Struktur des Treptowers ist in Abbildung 5 dargestellt. Die doppelt symmetrische Geometrie resultiert auch in einer doppelt symmetrischen Partitionierung des Gebiets durch die Schwerachsenmethode auf vier Prozessoren.

Bei der Partitionierung auf 16 Prozessoren entstehen kleinere Partitionen im Bereich der Baugruben. Dies lässt sich auf eine in diesem Bereich definierte feinere Netzdichte zurückführen, was bei der Anwendung der Schwerachsenmethode durch die Gewichtung berücksichtigt wird.

Der Lastausgleich durch die Lastverteilungsfunktion, die aus der Netzdichtefunktion abgeleitet wird, gelingt hier recht gut, so dass die Abweichungen der Elementanzahlen auf den einzelnen Prozessoren nur gering sind [Bur2000].



**Abbildung 6: Effizienz-Diagramm der parallelen Diskretisierung**

## 6 Zusammenfassung

Es wurde ein effektives Verfahren zur dreidimensionalen Modellierung zeitabhängiger Baugrund-Tragwerksysteme vorgestellt, das mit Hilfe eines geometrisch basierten Zerlegungsverfahrens für die Parallelverarbeitung geeignet ist. Dabei wird die Gebietszerlegung bereits vor der Diskretisierung durchgeführt, um auch diesen rechenintensiven Präprozess zu parallelisieren. Die Anwendung von Dichtefunktionen erfüllt die speziellen Anforderungen der verteilten Diskretisierung mit zu verfeinernden Gebieten.

Die Entwicklung des Baugrund-Tragwerk-Systems unter Berücksichtigung der Bauzustände und der aus ihr resultierenden Belastungshistorie wird mit Hilfe einer objektorientierten Datenbank abgebildet, so dass eine durchgängige und konsistente Modellierung unterstützt wird. In der Datenbank werden die Baugrund-Modelle, die Konstruktions-Modelle und die den Bauzuständen zugehörigen Diskretisierungen und Ergebnisse der Simulation persistent gesichert.

## 7 Literatur

- [Ter2001] Terlinden, Inke; Meißner, Udo F.: Simulation of fluid flow in porous media with object oriented techniques. In: K. J. Bathe (Hrsg.): Proceedings of the 1st MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Vol. 2, S. 985-988, Elsevier Science Ltd., Cambridge, USA 2001
- [Wea1996] Weatherill, N.P.: A review of mesh generation. In: B.H.V. Topping (Hrsg.), Advances in Finite Element Technology, Second International Conference on Computational Structures Technology, Budapest, S. 1-10, Civil-Comp Press, Edinburgh, Scotland 1996.
- [Lae1997] Lämmer, Lutz.: Dynamic load balancing for parallel adaptive finite element techniques. In: B.H.V. Topping (Hrsg.), EuroConference on Parallel Computing in Computational Mechanics, Advances in Computational Mechanics with parallel and distributed processing, S. 113-118, Civil-Comp Press, Edinburgh, Scotland 1997.
- [Bur2001] Burghardt, Michael: Parallele Netzgenerierung für ebene und räumliche Problemstellungen aus dem Bauwesen, Berichte, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2001
- [Sch1998] Schönenborn, Ingo: Prozeßorientierter Entwurf einer Boden-Tragwerk-Struktur, Berichte, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 1998
- [Dia1997] Diaz, Joaquin: Objektorientierte Modellierung geotechnischer Systeme, Berichte, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 1997
- [Rub2002] Ruben, Jochen; Meißner, Udo F.: Modelling and Simulation of Soil-structured Interactions in a Distributed Environment. In: Proceedings of the 14th International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR XIV), Elsevier, ISBN 0-444-50975-5, S. 25-32, Delft, Niederlande 2002
- [Bur2000] Burghardt, Michael; Meißner, Udo F.; Lämmer, Lutz: Dreidimensionale Finite-Element-Baugrundmodelle für Ingenieurprobleme. In: Hempel, L. (Hrsg.) ; Kirschke, H. (Hrsg.): Promise and Reality, Internationales Kolloquium über An-



wendung der Informatik und der Mathematik in Architektur und Bauwesen (ikm; Tagungs-CD-ROM); Weimar, 2000

- [Lae1997] Lämmer, Lutz: Parallelisierung von Anwendungen der Finite-Element-Methode im Bauingenieurwesen, Habilitation, März 1997
- [Kat1993] Katzenbach, R.: Zur technisch-wirtschaftlichen Bedeutung der Kombinierten Pfahl-Plattengründung, dargestellt am Beispiel schwerer Hochhäuser, Bautechnik 70 Heft 3, 161-170, 1993
- [Reu2000] Reul, O: In-situ-Messungen und numerische Studien zum Tragverhalten der Kombinierten Pfahl-Plattengründung, Mitteilungen des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt Heft 53, 2000